

トンネル緩衝工の長さの検討方法

中村 真也* 福田 傑* 宮地 徳蔵* 斉藤 実俊*

A Method for Estimating the Length of a Tunnel Hood

Shinya NAKAMURA Takashi FUKUDA Tokuzo MIYACHI Sanetoshi SAITO

An impulsive pressure wave (micro-pressure wave) emitted from a tunnel portal is one of the wayside environmental problems in high-speed railways. The most prevailing countermeasure for reducing the micro-pressure wave on the infrastructure side is installation of a tunnel ‘entrance’ hood. This paper describes an estimation method for the length of the hood required for a tunnel to be constructed on a new railway. This method analyzes the magnitude of the micro-pressure wave, and estimates the hood length required in accordance with the magnitude of the micro-pressure wave using the values required for the design of the train and the tunnel hood and the empirical parameters.

キーワード：高速鉄道，微気圧波，放射立体角，緩衝工，トンネル

1. はじめに

昭和50年3月に山陽新幹線の博多開業のための訓練運転が開始されると、スラブ軌道の長いトンネル坑口でパルス状の圧力波（トンネル微気圧波¹⁾）が放射され、大きな発破音が発生したり、家屋の戸や窓が「ガタン」と揺れたりするという苦情が当時の国鉄工事に寄せられるようになった。国鉄鉄道技術研究所および承継機関である公益財団法人鉄道総合技術研究所（鉄道総研）は、この現象の解明を進めるとともに、トンネル緩衝工（以下、緩衝工）などの各種の低減対策の開発を行ってきた。現在では、地上側および車両側の低減対策を講じることにより、最高速度320km/hの営業運転が実現されている。

トンネル微気圧波（以下、微気圧波）の地上側対策として、トンネル坑口に設置する緩衝工がある。緩衝工はトンネル本坑よりも一回り大きい断面を有するフードで、その側面には開口部が設けられており、長いほど効果が大きい。これまで鉄道総研では新線建設に対応し、沿線環境を損なわないよう、低減目標値を参照しながら必要な緩衝工の長さの検討を行ってきた。この検討では、一度に多くのトンネルを扱うことが多いため、経験的なパラメータを使用し、さらに車両や緩衝工の設計要求値を与えることで、簡易に緩衝工の長さを求めることを可能としている。しかしながらその方法について、まとまった報告はない。そこで本稿では、微気圧波の現象および地上側の低減対策法について述べるとともに、緩衝工の長さの基本設計法について述べる。

2. 微気圧波の現象および地上側の低減対策法

2.1 微気圧波の予測

微気圧波の予測は、(a) 圧縮波の形成、(b) 圧縮波の伝播、(c) 微気圧波の放射の三段階に分けて行うのが通常である。(a) においては、Howeの音響学的手法²⁾やCFD³⁾がある。これらの手法においては、少なくとも列車の先頭部断面積分布と列車速度、トンネルや緩衝工の断面積や開口部の位置などの情報が必要となる。(b) においては、(a)の手法において予測されたトンネル内圧縮波の波形を初期波形とした次元の波動解析⁴⁾がある。この解析には、トンネルの大きさと摩擦に関する経験的なパラメータが必要であるが、日本の新幹線トンネルに関してはよく知られている。トンネルの大きさなどについて大規模な仕様変更があった場合には、パラメータ推定のため現地試験結果が必要となる。(c) においては、出口緩衝工の詳細な仕様や坑口周りの地形を入力パラメータとした音響解析^{5) 6) 7)}やCFD³⁾による予測手法が提案されている。

これらの予測手法は精度の高い予測結果が得られる反面、入力パラメータとして詳細な情報が必要となる。緩衝工設計時にこれらの情報が既知な場合はよいが、新幹線の新線設計時には、未知な場合が多い。新線建設においては、例えば車両の形状が決まっていない、出口の緩衝工の開口部の状態が与えられていない、坑口の位置が数十mの単位で移動する可能性を含んでいることなどが考えられる。また、設計時には建設前の地形条件のみが与えられているが、新幹線建設後には、当然ながら地形は異なるものとなる。このような条件の下では、上

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

記の詳細な予測に基づく緩衝工設計は事実上不可能である。さらには、上記の詳細な予測には、多大な計算時間を要する。実際の設計期間は短く、設計が必要な緩衝工の数は多い。このようなニーズにこたえるため、緩衝工の必要長さの基本設計は、まず、緩衝工開口部や列車先頭部形状の詳細が与えられていない状態で、これらの性能を表す経験的なパラメータを使用して簡易な手順で行う。次に、使用されたパラメータを先頭部形状や緩衝工開口部に対する要求値として詳細設計する。

2.2 圧縮波の形成

“(a) 圧縮波の形成” に関して、列車が突入するときにトンネル内に形成される圧縮波の波形（波面）は図1のようになる。この突入時に形成される圧縮波の波面の圧力 Δp は、式(1)のように表され⁸⁾、列車速度 V の二乗にほぼ比例する。

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho V^2 \frac{1 - (1-R)^2}{(1-M)\{M + (1-R)^2\}} \quad (1)$$

ただし、 R はトンネル断面積に対する列車断面積の比（= A_t/A 、 A_t は列車断面積、 A はトンネル本坑断面積）、 ρ は大気密度、 M は列車のマッハ数（= V/c 、 c は空気中の音速）である。また、圧縮波の波面の圧力上昇時間 Δt は、列車速度 V に反比例し、列車先頭部等に関する代表長さ l に比例すると考えられるので、式(2)となる。

$$\Delta t = \frac{l}{V} \quad (2)$$

ただし、 l は列車先頭部形状およびトンネル入口形状に依存するパラメータで、ここでは特性長さと呼ぶ。よって、式(1)、(2)より列車突入側坑口における圧縮波の波面圧力勾配最大値 $(\partial p / \partial t)_{\max, EN}$ は、式(3)となる。

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max, EN} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho \frac{V^3}{l} \frac{1 - (1-R)^2}{(1-M)\{M + (1-R)^2\}} \quad (3)$$

式(3)より、圧縮波の波面圧力勾配最大値 $(\partial p / \partial t)_{\max, EN}$ は、列車マッハ数 M が小さいとき、列車のトンネル突入速度 V の三乗にほぼ比例することがわかる。

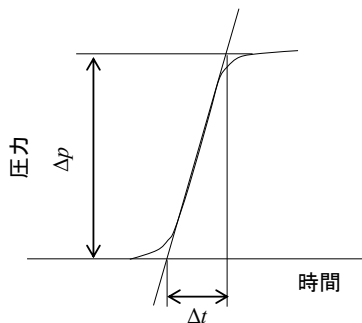


図1 列車突入時のトンネル内圧縮波の時間波形

2.3 圧縮波の伝播

“(b) 圧縮波の伝播” に関しては、トンネル内での圧縮波の伝播距離が長くなると、圧縮波の波形は変形するが、その変形の仕方は軌道種別によって異なる。バラスト軌道トンネルの場合、バラスト層の効果により、圧縮波の波面は伝播とともに緩やかになる（図2）。一方、スラブ軌道トンネルでは、圧力の高い部分ほど波の伝播速度が高いという非線形効果により、波面が切り立ってくる（図3）。波面の切り立ちは、入口での圧力勾配が大きいほど、また伝播距離が長いほど大きくなる。

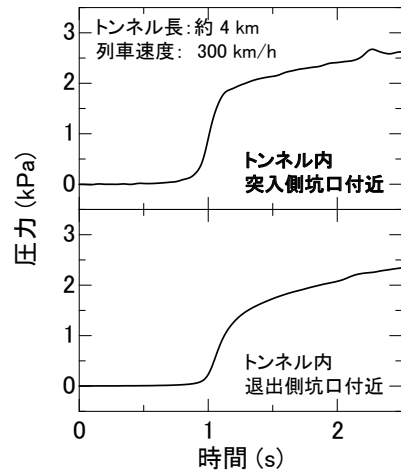


図2 バラスト軌道トンネル内を伝播する圧縮波の波形例⁹⁾ (著者編集)

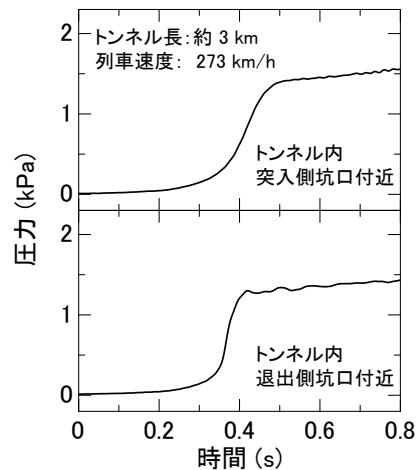


図3 スラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の波形例¹⁰⁾ (著者編集)

新幹線のトンネル内を伝播する圧縮波の波面の圧力勾配最大値の変化の推定に関しては、次式が提案されている。

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max, x} = \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max, 0} \times \exp\left\{\left[\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max, 0} - \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max, \text{cri}}\right] a x\right\} \quad (4)$$

ただし、 $(\partial p/\partial t)_{\max, 0}$ ：距離 $x=0$ （伝播前）における圧力勾配最大値、 $(\partial p/\partial t)_{\max, x}$ ：距離 x における圧力勾配最大値、 $(\partial p/\partial t)_{\max, \text{cri}}$ ：臨界圧力勾配最大値（波面が切り立つ最少の値、表 1）、 x ：伝播距離（トンネル退出側坑口の $(\partial p/\partial t)_{\max, \text{EX}}$ を求める場合はトンネル長を入力）、 a ：波面の切り立ちを表す係数（表 1 参照）、添え字 x ： x における値、添え字 0：座標 $x=0$ における値である。

突入側坑口での初期圧力勾配最大値 $(\partial p/\partial t)_{\max, 0}$ が大きいほど、退出側坑口での圧力勾配最大値が大きくなる。ただし、長大なスラブ軌道トンネルでは、ある伝播距離まで波面圧力勾配が切り立ったあと緩やかになるので、経験式の適用範囲は 7km 程度までの短いトンネルである。

表 1 a , $(\partial p/\partial t)_{\max, \text{cri}}$ の値

軌道種別	a (km・kPa/s) ⁻¹	$(\partial p/\partial t)_{\max, \text{cri}}$ (kPa/s)
バラスト	4.8×10^{-3}	4.0×10
スラブ	2.7×10^{-2}	2.7

2.4 微気圧波の放射

“(c) 微気圧波の放射” に関して、トンネル坑口から放射される微気圧波の大きさ P_{\max} は低周波遠方場近似の式¹⁾¹¹⁾を出口緩衝工がある場合に拡張して式 (5)、式 (6) のように表す。

$$P_{\max} = \frac{2A}{\Phi' cr} \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\max, \text{EX}} \quad (5)$$

$$\Phi' = k\Omega = k'2\pi \quad (6)$$

ただし、 A はトンネル断面積、 Ω はトンネル坑口の地形から決まる放射立体角、 r は坑口中心から測定点までの距離、 $(\partial p/\partial t)_{\max, \text{EX}}$ はトンネル坑口に到達した圧縮波の波面の圧力勾配最大値である。また、 k は補正係数 (k' は放射立体角を 2π とした場合の補正係数)、 Φ' は出口緩衝工や指向性などの影響を考慮した有効放射立体角である。

式 (5)、式 (6) から、微気圧波の大きさ P_{\max} は、トンネル坑口に到達した圧縮波の波面の圧力勾配最大値

$(\partial p/\partial t)_{\max, \text{EX}}$ に比例し、坑口からの距離 r と放射立体角 Ω に反比例することがわかる。このとき、トンネル坑口の地形から決まる放射立体角 Ω の値を決めておく必要がある。トンネル坑口の放射立体角とは、トンネル坑口から明かり区間方向を見たときの空間的な広がりを表す。微気圧波の予測においては、地形図からトンネル坑口付近の高度を読み取り (図 4)、その値から幾何学的に放射立体角 Ω を求める。

微気圧波は出口緩衝工の開口部の影響や地形の影響を受ける。それらの影響を k を用いて考慮し、放射立体角 Ω に対して補正したものを有効放射立体角 Φ' として使用する。また k には後述するように、安全率の概念が含まれる。

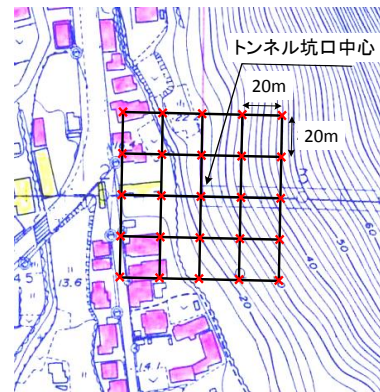


図 4 トンネル坑口付近の高度の読み取り

2.5 緩衝工による低減対策

緩衝工は、効果、費用、実績などの点で地上側微気圧波対策の中心となるものである。その目的は、圧縮波波面の圧力勾配を列車のトンネル突入段階で十分小さくしておくことであり、これにより反対側坑口の微気圧波を低減することができる。その構造は、列車突入側の坑口にトンネル本坑の断面の 1.4 倍程度の断面積をもつフードを設置し、その側面あるいは天井面に適切な開口部を設けたものである。

緩衝工の低減効果に影響する因子は、長さ、緩衝工・トンネル断面積比、開口部の大きさと位置、列車先頭部形状である。開口部の大きさと位置が不適切であると、十分な低減効果が得られない。緩衝工による圧縮波波面の圧力勾配の低減比 α は、近似的に次式のように表すことができる。

$$\alpha = \frac{D}{D+L} \quad (7)$$

ただし、 L は緩衝工の長さ、 D は緩衝工断面・トンネル断面・先頭形状により決まる特性長さであり、例えば山

陽新幹線におけるトンネル断面、緩衝工断面、0系車両の組み合わせでは、 D は約12mである¹²⁾。式(7)より、 D が小さいほど緩衝工単独の微気圧波低減効果は大きくなるが、緩衝工の開口部が適切に開けられていないと、 D の値は大きくなる。また、列車先頭部が長いほど、 D の値は大きくなる傾向がある。図5に緩衝工による微気圧波低減効果の例を示す¹²⁾。

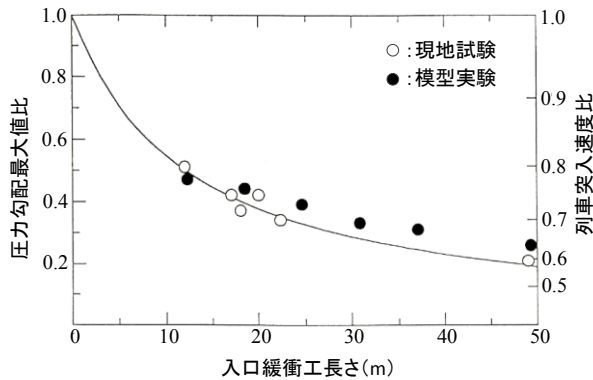


図5 トンネル入口緩衝工の微気圧波低減効果

2.6 枝坑による低減対策

比較的長いトンネルでは、施工上あるいは保守上の理由により、枝坑(斜坑、立坑、横坑、水路など)をもつものが多い。これらを利用する対策法¹³⁾は、本坑内を伝播していく圧縮波の一部を枝坑に分岐させ、本坑を伝播する圧縮波の波面の圧力勾配を小さくし、最終的に出口で放射される微気圧波を低減するものである(図6)。

枝坑の奥行きが十分に長い場合、枝坑通過前後の圧縮波の波面の圧力勾配最大値の比 β は、次式で表される¹⁾。

$$\beta = \frac{2}{2+n}, \quad n = \frac{A_b}{A} \quad (8)$$

ただし、 A :トンネル本坑断面積、 A_b :枝坑断面積である。枝坑の奥行きについては、本坑を圧縮波の波面が通過する間に、枝坑に分岐した波が反射して戻ってこないだけの長さ以上あればよく、通常その長さは30m程度である。

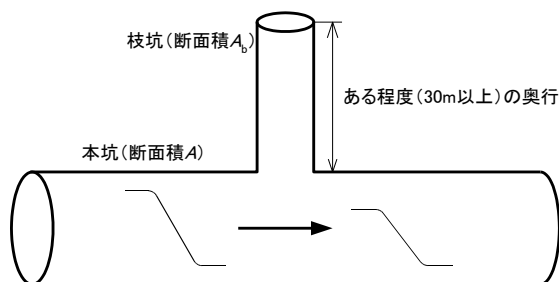


図6 枝坑による圧縮波波面の圧力勾配の低減

したがって、枝坑を利用する箇所では防風・防圧用の扉を枝坑内に設ける場合には、本坑接合部から30m以上離して設置する必要がある。

3. 緩衝工の長さの検討

3.1 微気圧波の低減目標

微気圧波については、鉄道沿線騒音のような公的基準は存在しない。しかし、国鉄～JRにおける山陽・東北・上越新幹線での経験から、通常、次の低減目標が従来から用いられている¹⁴⁾。

- (1) 坑口中心から20m点で微気圧波ピーク値が50Pa以下
- (2) 坑口近傍の民家(屋外)で微気圧波ピーク値が20Pa以下

上記(1)の目標は、坑口付近で発破音を発生させないための目安値であり、(2)の目標は、民家の建具振動の問題を生じさせないための目安値である。ただしこれらの目標は、それを達成すれば絶対に環境問題が生じないというような保証を与えるものではなく、あくまでも従来の経験から得られた目安値であることに注意が必要である。

3.2 緩衝工長さの検討方法

微気圧波の現象の三段階を順に推定していくことによって緩衝工の長さを求める方法について述べる。低減目標を上回る微気圧波の発生が予測されたトンネル坑口については、その“反対側”の坑口(列車突入側の坑口)に緩衝工を設置する。一般には、列車がトンネルの起点側坑口に突入する場合(下り列車)と、終点側坑口に突入する場合(上り列車)の両方について、それぞれ必要な緩衝工長さを計算する必要がある。図7に、必要な緩衝工の長さ算出手順の概略についてのフローチャートを示す。最初に、起点側坑口を列車突入側坑口に、終点側坑口を列車退出側坑口(微気圧波発生坑口)に設定する。

式(5)を用いて、退出側坑口で第一の低減目標(坑口から20m点で50Pa)の微気圧波が発生するときの退出側坑口での圧縮波波面の圧力勾配最大値を求める。そして式(4)から、そのときの突入側坑口での圧縮波波面の圧力勾配最大値を求める。この値と無対策(緩衝工が無い)のときの突入側坑口での圧縮波波面の圧力勾配最大値の比が式(7)の圧力勾配最大値比 α となるので、緩衝工の長さ L が算出できる。次に、第二の低減目標(坑口から一番近い民家位置で20Pa)を満たす緩衝工の長さ L' を、第一の低減目標の場合と同様にして算出する。そして、第一と第二の各低減目標から算出された L と L' を

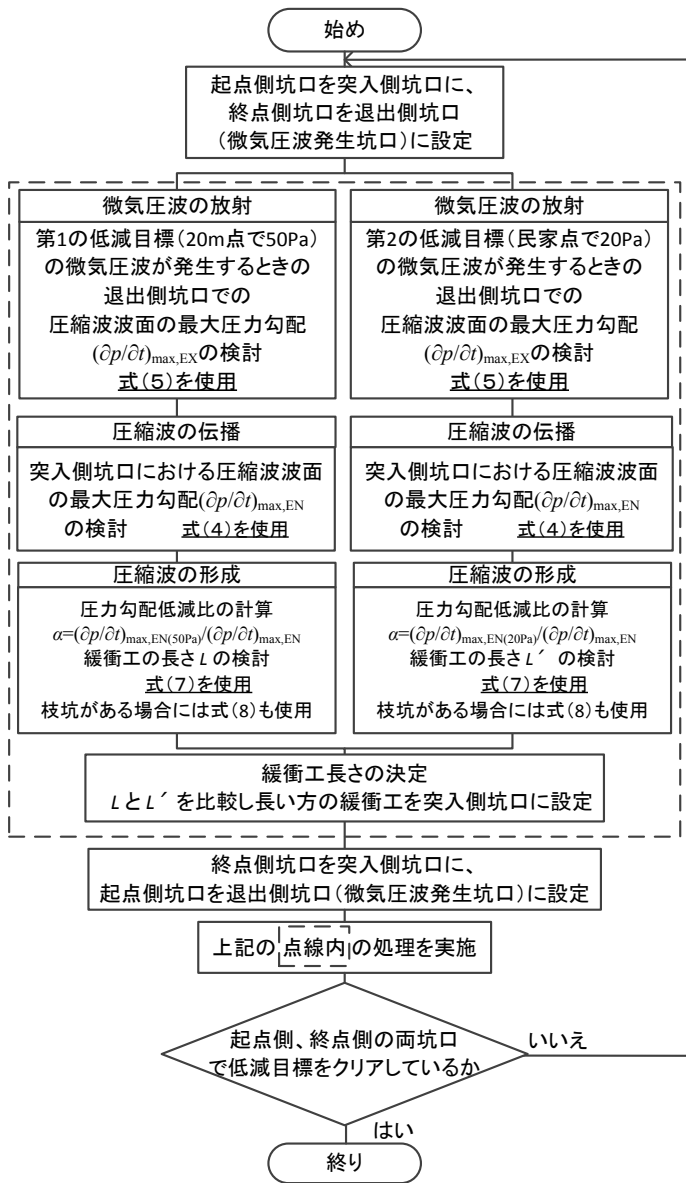


図7 必要な緩衝工長さ算出のフローチャート

比較し、長い方の値を必要緩衝工長さとして起点側坑口（突入側坑口）に設定する。

4. 検討方法の安全率

前章までに述べた緩衝工長さの基本設計においては、以下のパラメータを使用している。

- (a) 圧縮波の形成：車両先頭部の性能を表す特性長さ l と緩衝工開口部性能を表す特性長さ D 。
- (b) 圧縮波の伝播：波面の切り立ちを表す係数 a と臨界圧力勾配最大値 $(\partial p/\partial t)_{\max, \text{cri}}$ 。
- (c) 微気圧波の放射：出口緩衝工の影響を表す k および放射立体角 Ω 。

これらの6個のパラメータにおいて k と Ω のみが緩

衝工長さの検討時には未定の数となる。パラメータ l と D は、緩衝工長さ が得られたのち、車両および緩衝工の詳細設計において達成されるべき要求値となる。パラメータ a と $(\partial p/\partial t)_{\max, \text{cri}}$ は、新幹線トンネルにおいてはほぼ一定の経験定数である（表1参照）。したがって、これらの4個のパラメータは、緩衝工長さの検討時には既知としてよい。ところが k と Ω は出口緩衝工、開口部、坑口周辺の地形の詳細が確定しなければ決定できない。文献⁶⁾の実験結果から、出口緩衝工の開口部の位置と観測点の関係によって k の値は大きく変わらう。また、坑口位置とそのまわりの地形の確定情報がないため、 Ω の値も、概算値しか求めることができない。そこで、出口緩衝工や地形の影響を無視した参照条件を仮定し、これに安全率 s を乗じて微気圧波の放射に関する設計を行うことを考える。参照条件として、出口緩衝工がないこと、出口まわりの地形を平地 ($\Omega=2\pi$) とする。参照条件で微気圧波の目標値 $P_{\max, \text{cri}}$ を満たすトンネル出口圧力勾配最大値を $(\partial p/\partial t)_{\max, \text{ref}}$ とすると、式(5)より、式(9)となる。

$$P_{\max, \text{cri}} = \frac{2A}{2\pi cr} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{\max, \text{ref}} \quad (9)$$

実際の微気圧波は、出口緩衝工の影響などによってこれよりも大きくなる場合があるので、安全率 s を乗じた微気圧波が生じるとすると式(10)となる。

$$P_{\max} = s \frac{2A}{2\pi cr} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{\max} \quad (10)$$

このとき、微気圧波が目標値以下となる条件は式(11)、式(12)であり、参照状態よりも厳しい条件となる。

$$s \frac{2A}{2\pi cr} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{\max} < P_{\text{cri}} = \frac{2A}{2\pi cr} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{\max, \text{ref}} \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{\max} < \frac{1}{s} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{\max, \text{ref}} \quad (12)$$

式(5)、式(6)と式(10)を比較すると式(13)が得られる。

$$s = \frac{1}{k \left(\frac{\Omega}{2\pi} \right)} = \frac{1}{k'} \quad (13)$$

すなわち、 k' の逆数は出口緩衝工や地形の影響を無視した条件を参照として実際の緩衝工長さを設計する際の微気圧波の大きさに対する安全率となっていることがわかる。

実際の新線建設時において、緩衝工長さを「基本設計」により決定した後には、次の段階として緩衝工開口部の設定など「詳細設計」が行われる。詳細設計では必要に応じて模型実験やCFDなどを用いる。検討するトンネルが7km以上の長大トンネルである場合には、波形の変形において初期波形依存性を考慮した緩衝工開口部の詳細設計など¹⁵⁾を行う必要があり、数値計算や現地試験による最終調整が行われる。

5. まとめ

本稿では微気圧波の現象および地上側の低減対策法について述べるとともに、緩衝工の長さを求める方法について述べた。この検討方法は、経験的なパラメータを使用し、さらに車両や緩衝工の設計要求値を与えることで、簡易に緩衝工の長さを求めるもので、一度に多くのトンネルを扱うことが可能となる。また、緩衝工長さを検討する時に用いる微気圧波の予測値について考察し、安全率に対する考え方を整理した。

文 献

- 1) 小沢智：トンネル出口微気圧波の研究，鉄道技術研究報告，No. 1121，1979
- 2) Howe, M.S., et al. :Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.297, pp.267-292, 2006.
- 3) Miyachi, T., et al. :Numerical simulation of compression wave propagation in German slab-track tunnels, *World Congress on Railway Research*, 2016.
- 4) 宮地徳蔵 ほか, :新幹線スラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形の基礎方程式, 日本機械学会論文集, Vol178, pp.60-73, 2012
- 5) Miyachi, T., :Acoustic model of micro-pressure wave emission from a high-speed train tunnel, *Journal of Sound Vibration*, Vol.391, pp.127-152, 2017.
- 6) 渥美浩和 ほか, :側面開口部付き緩衝工から放射される微気圧波, 鉄道総研報告, Vol.28, No.3, 2014
- 7) Miyachi, T., et al. :Acoustic modelling of micro-pressure waves emitted from high-speed railway tunnels with vented tunnel hoods, *International Symposium on Aerodynamics, Ventilation & Fire in Tunnels*, 2017.
- 8) 原朝茂：列車が高速で隧道に突入する場合の流体力学的諸問題，鉄道技術研究報告，No. 153，1960
- 9) 宮地徳蔵 ほか, :バラスト軌道トンネル内圧縮波の伝播の数値計算とその検証，鉄道総研報告，Vol.21, No.3, 2007
- 10) 福田傑：高速鉄道トンネル内を伝播する圧縮波に関する研究，鉄道総研報告，特別 28，1999
- 11) 山本彬也：トンネル出口からの微気圧波，日本物理学会春の分科会 応用数学，力学，流体物理予稿集，1977
- 12) 前田達夫：列車の空気力学特性およびトンネル微気圧波低減対策法に関する研究，鉄道総研報告，特別 20，1998
- 13) 山本彬也 ほか, :トンネル内の枝坑を利用した微気圧波低減対策の効果 - 上越新幹線榛名，中山トンネルの場合 - ，鉄道技術研究報告，No. 1250，1983
- 14) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，2008.4
- 15) 宮地徳蔵：トンネル微気圧波に関する理論的および実験的研究，大阪府立大学博士論文，2012